

非磁性半導体/強磁性半導体ヘテロ接合における新しい電子伝導現象を発見 ～次世代のスピン트로ニクス・デバイスの実現に新たな道筋～

1. 発表者

瀧口 耕介（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 博士課程 1年）
レ デュック アイン(Le Duc Anh)（東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教）
千葉 貴裕（福島工業高等専門学校 講師）
小山 知弘（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教：研究当時）
千葉 大地（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授：研究当時）
田中 雅明（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授）

2. 発表のポイント

- ◆非磁性半導体と強磁性半導体（注1）からなる二層のヘテロ接合を作製し、新しい電子伝導現象を発見しました。磁場を印加したときの電気抵抗の変化（磁気抵抗効果、注2）は最大80%に達し、この磁気抵抗効果は金属や絶縁体を用いた同様の二層のヘテロ接合で観測された磁気抵抗に比べて約800倍の大きさです。
- ◆この磁気抵抗効果は、磁場の向きを変えた時の振る舞い（磁場方向についての対称性）が、これまでに知られているいかなる磁気抵抗効果とも異なり、新しい磁気抵抗効果と言えます。
- ◆加えて、この磁気抵抗の大きさはゲート電圧により変調可能で、電流と磁性の結合を電気的手段によって制御できることを明らかにしました。本研究は、強磁性半導体を用いた次世代のスピン트로ニクス（注3）・デバイスの実現に新たな道筋を示したことができます。

3. 発表概要

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の瀧口耕介大学院生、Le Duc Anh 助教、田中雅明 教授、同物理工学専攻の小山知弘 助教（研究当時）、千葉大地 准教授（研究当時）、福島工業高等専門学校の千葉貴裕 講師のグループは、すべて半導体でできた非磁性半導体/強磁性半導体からなる二層ヘテロ接合を作製し、新しい電子伝導現象を発見しました。磁場を印加したときの電気抵抗の変化（磁気抵抗効果）は最大で80%に達し、金属や絶縁体を用いた同様の構造に比べて約800倍大きな値です。研究グループが作製したのは、非磁性半導体であるヒ化インジウム（InAs）薄膜（厚さ15 nm）とアンチモン化ガリウムに鉄を添加した強磁性半導体 GaFeSb の薄膜（15 nm）を積層した二層のヘテロ接合です。このヘテロ接合で観測された磁気抵抗効果は、これまでに知られているどのような磁気抵抗効果と比べても、磁場の向きを変えた時の振る舞い（磁場方向についての対称性）が異なり、新しい磁気抵抗効果と言えます。さらに、このヘテロ接合をトランジスタに加工することで、外部からの電圧によって InAs 薄膜中の電子状態を変化させることが可能になります。InAs は非磁性の半導体ですが、電圧を印加することで隣接する GaFeSb 薄膜の磁気的な性質を InAs に付与し、磁気抵抗の大きさをゲート電圧により変調できること、すなわち、電流と磁性の結合を電気的手段によって制御できることが明らかになりました。

4. 発表内容

私たちが今生きる情報化社会は、大量の半導体デバイスを動作させることによって成り立っています。特に情報処理に用いられている「トランジスタ」の技術は、いまでは欠かせない存

在となったコンピュータやスマートフォンといった形で生活を支えています。近年では、IoTや人工知能の実現にますます注目が集まる中で、その演算や情報の記憶を担うトランジスタを代表とする半導体デバイスの性能向上を目指した研究はますます重要度が高まっています。そこで問題となっているのが、情報を操作したり記憶しておくために必要な電力が大きいことです。既存のトランジスタでは、情報は電荷の有無により表現されるので、その保持に大きなエネルギーが必要となります。研究グループが取り組む「スピントロニクス」という分野では、この問題を電子のスピン自由度（注4）に着目して解決しようとしています。スピンの私たちの生活の中で露に現れるのは、磁石の磁化（N極とS極が生ずること）ですが、この磁化の向きは一度決まればその保持にエネルギーは必要ありません。したがってN極とS極の向きの違いを情報の0と1に対応させ、それを電氣的に読み出すことができれば、情報の保持に必要な電力を大幅に減らすことができると期待されています。特に本研究グループでは、高速で動作するトランジスタ、LED、レーザなどを構成する半導体材料に、磁性元素（Fe, Mnなど）を添加することによって、半導体と磁石の性質を合わせ持つ「強磁性半導体」を作製しその新しい物性や機能を開発する研究に関して多くの実績があり、既存のエレクトロニクスと相性の良い強磁性半導体を用いたスピントロニクスを開拓しつつあります。

具体的に磁化の向きを電氣的に読み出すには、多様な物質、および構造の磁気抵抗効果を調べてゆく必要があります。著名なものではノーベル物理学賞（2007年）の受賞対象になった巨大磁気抵抗効果や、すでにハードディスクドライブの読み出しに用いられているトンネル磁気抵抗効果などがあります。しかしこれらの磁気抵抗効果では、大きな抵抗変化が得られる一方で、磁性層が多数必要で複雑な構造を要するため、デバイス加工が困難という面があります。一方、本研究と同様、非磁性体/強磁性体からなる二層ヘテロ接合を用いた先行研究では、構造は単純であるものの、電流と磁性の結合が弱いため、磁気抵抗変化が非常に小さくおよそ0.1%程度しかないという問題点がありました。

① 研究内容

研究グループは、すべて半導体でできた非磁性半導体/強磁性半導体からなる二層ヘテロ接合を作製し、新しい電子伝導現象を発見しました。磁場を印加したときの電気抵抗の変化（磁気抵抗効果）は80%に達し、これは金属や絶縁体を用いた同様の二層ヘテロ接合の磁気抵抗に比べて約800倍大きな値です。研究グループが作製した構造は、非磁性半導体であるヒ化インジウム（InAs）薄膜（厚さ15 nm）とアンチモン化ガリウムに鉄を添加した強磁性半導体GaFeSbの薄膜（15 nm）を積層した二層のヘテロ接合です。このヘテロ接合で観測された磁気抵抗効果は、これまでに知られているどのような磁気抵抗効果と比べて、磁場の向きを変えた時の振る舞い（磁場方向についての対称性）が異なり、新しい磁気抵抗効果を発見したと言えます。さらに、このヘテロ接合をトランジスタに加工することで、外部からの電圧によってInAs薄膜中の電子状態を変化させることが可能になります。InAsは非磁性の半導体ですが、電圧を印加することで隣接するGaFeSb薄膜の磁氣的な性質がInAsに付与され、磁気抵抗の大きさがゲート電圧により変調できること、すなわち、電流と磁性の結合を電氣的手段によって制御できることが明らかになりました。GaFeSbはInAsに比べてはるかに抵抗率が高いので、主にInAsに電流が流れます。電流を担う電子の波動関数は、図1に示すようにInAs層中に存在し2次元電子となりますが、量子力学的な効果により隣接するGaFeSb層（強磁性で磁化をもつ）にも一部が浸み出します（黄色い破線部分）。この波動関数のGaFeSb側への浸み出しによって、電流と磁化の結合が生じ、結果として磁場を印加したときの電流の変化、すな

わち磁気抵抗が得られたと考えられます。また、InAs が半導体であることから、外部からのゲート電圧によって波動関数の位置を制御できるので、結合そのものを電氣的な手段で制御することが可能です。これはゲート電圧を変えると磁気抵抗効果の大きさが変調されていることから、実験的に確認することができました。この結果は、磁性を持たない非磁性半導体中に、電圧を印加するという電氣的な手段により磁氣的な性質を付与できたことを意味します。

② 社会的意義・今後の予定

本研究は、ゲート電圧により電子状態を変調できるという半導体の利点に、強磁性体の持つ不揮発性性質を付与できたこと、さらに磁化の情報を大きな磁気抵抗効果という手段で読み出すことができることを示したという点で、強磁性半導体を用いた次世代スピントロニクス・デバイスの実現に向けて新たな道筋を示したということができます。さらに、本研究で用いた半導体の接合は超伝導体と組み合わせることで、マヨラナ粒子（注5）という新しい物理現象が実現でき量子情報処理にも使える可能性があるということが知られており、物理学的にも大変興味深い展開が期待できます。

5. 発表論文誌：

雑誌名：*Nature Physics*

論文タイトル：Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic-nonmagnetic bilayers

著者：Kosuke Takiguchi, Le Duc Anh, Takahiro Chiba, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, and Masaaki Tanaka

DOI 番号：10.1038/s41567-019-0621-6

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41567-019-0621-6>

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科総合研究機構および電気系工学専攻
助教 レ デウック アイン (Le Duc Anh)

東京大学 大学院工学系研究科
スピントロニクス学術連携研究教育センター センター長
電気系工学専攻 教授
田中 雅明 (たなか まさあき)

7. 用語解説：

(注1) 強磁性半導体とは、半導体と強磁性体の両方の性質をあわせ持つ物質であり、現在は、主に半導体 (II-VI 族、III-V 族) の結晶成長中に磁性元素 (Mn, Fe, Co など) を添加した混晶半導体が主流である。既存の半導体材料や技術との整合性が良いので、将来のスピントロニクス・デバイスに使われる材料として期待されている。最近、本研究グループは、キュリー温度 (強磁性を示す温度の上限) が室温を超える n 型強磁性半導体(In,Fe)Sb および p 型強磁性半導体(Ga,Fe)Sb を開発した。

(注2) 磁気抵抗効果とは、物質の電気抵抗が磁場を印加すると変化する現象。この抵抗の変化率（磁気抵抗比）が大きいほど利用価値が高く、センサに応用する場合には感度が高く、メモリに応用する場合には読み出しの効率が良い。

(注3) スピントロニクス：電子は「電荷」とともに自転の角運動量に相当する「スピン」を持っている。スピントロニクス (Spintronics)とは、「電荷」と「スピン」の両方を活用して、新しい機能をもつ物質や材料の設計、デバイス、エレクトロニクス、情報処理技術などに応用しようとする分野である。

(注4) スピン自由度：電子の磁石としての向きの自由度。スピンは古典的には電子の自転に相当する角運動量である。電子はスピンを持つことによって磁気モーメントを持ち、物質中でこの磁気モーメントが1つの向きに揃った状態が強磁性であり、磁気モーメントの合計が磁化である。これが磁石の磁化や磁力の主な起源となっている。

(注5) マヨラナ粒子：粒子自身とその反粒子が同等である粒子を指す。近年、量子計算に用いる可能性が示されたことから大きく注目を集めている。

8. 添付資料：

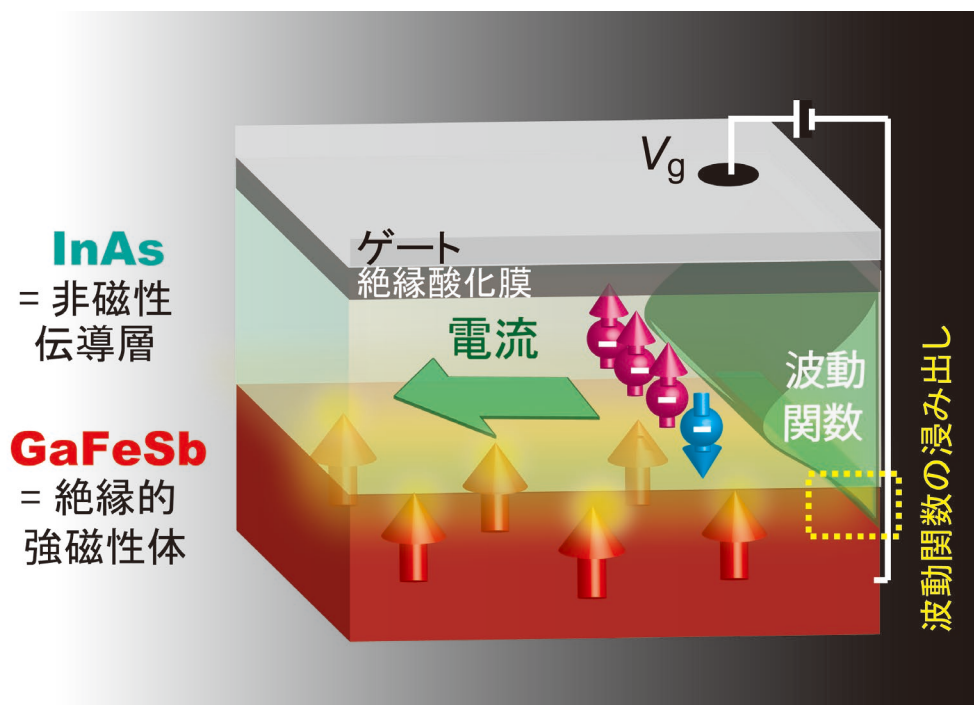


図1 電流を担う電子の波動関数は、InAs 層中に存在し 2次元電子となるが、量子力学的な効果により隣接する GaFeSb 層 (強磁性で磁化をもつ) にも一部が空間的に浸み出す (黄色い破線部分)。この電子の波動関数の GaFeSb 側への浸み出しによって、電流と磁化の結合が生じ、結果として磁場を印加したときの電流の変化、すなわち磁気抵抗効果が得られる。また、外部からのゲート電圧 V_g によって波動関数の位置を制御できるので、この結合そのものを電氣的な手段で制御することが

可能であり、 V_g を変えると磁気抵抗効果の大きさが変調される。この結果は、磁性を持たない非磁性半導体中に、電圧を印加するという電氣的な手段により磁氣的な性質を付与できることを示す。